

DOI: 10.5846/stxb202106111558

谢璐迪, 玉米提·哈力克, 史磊, 田奥磊, 阿丽亚·拜都热拉. 干旱区绿洲城市树木健康评估及影响因素——以乌鲁木齐市为例. 生态学报, 2022, 42(22): 9284-9296.

Xie L D, Ümüt Halik, Shi L, Tian A L, Aliya Baidourela. Health assessment of urban trees in arid land oasis cities and its influencing factors: a case study of Urumqi. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9284-9296.

干旱区绿洲城市树木健康评估及影响因素 ——以乌鲁木齐市为例

谢璐迪^{1,2}, 玉米提·哈力克^{1,2,*}, 史磊^{1,2}, 田奥磊^{1,2}, 阿丽亚·拜都热拉³

1 新疆大学生态与环境学院, 乌鲁木齐 830017

2 新疆维吾尔自治区绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830017

3 新疆农业大学林学与园艺学院, 乌鲁木齐 830052

摘要: 树木作为城市绿色基础设施重要组分, 其健康直接影响城市生态系统服务及人居环境质量。城市化进程加快导致生态土地缺失, 同时缺乏合理养护加之极端自然条件干扰对树木健康造成严重威胁。为揭示城市树木健康风险及影响因素, 对乌鲁木齐市核心区 117 个样地绿化树木进行健康评估, 从 4 个维度 12 个指标构建树木健康分级体系, 基于样地调查结果, 分析树木组成、结构、关联性、健康状况及影响因素, 揭示乌鲁木齐市不同功能区树木健康差异。旨在为研究区树木健康保护、城市绿地可持续经营及城市生态文明建设提供理论依据和数据支撑。结果表明: (1) 乌鲁木齐市城市园林树木乔灌比为 8.3:1, 树木多样性与种间关联程度较低。榆树占比高达 43.87%, 其中白榆占比 22.62%, 是主要优势树种; (2) 不同树种健康程度呈现差异性, 榆树类健康状况呈现圆冠榆 > 大叶榆 > 白榆 > 垂枝榆特征; (3) 城市不同功能区树木健康也呈现异质性; 以公园和居住小区树木健康分值较高, 而行道树和学校庭院树木健康分值相对较低, 且冗余分析进一步揭示地面铺装、林木配置结构、生长空间和胸径对树木健康影响程度最为显著。未来优化城市树木生境条件、提升物种丰富度、加强古树名木保育和提高园林绿化管理水平是维护和提升绿洲城市树木健康的重要举措。

关键词: 绿洲城市; 城市树木健康; 冗余分析; 影响因素; 乌鲁木齐

Health assessment of urban trees in arid land oasis cities and its influencing factors: a case study of Urumqi

XIE Ludi^{1,2}, Ümüt HALIK^{1,2,*}, SHI Lei^{1,2}, TIAN Aolei^{1,2}, Aliya BAIDOURELA³

1 College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

3 College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: Urban green space is an important natural and heterogeneous component of urban landscape, which plays an important role in providing urban ecosystem services and improving residents' well-being. As an important component of urban green infrastructure, the health status of urban trees directly affects urban ecosystem services and the quality of human settlement environments. The accelerated urbanization process leads to the loss of ecological land, and the lack of reasonable maintenance and the disturbance of extreme natural conditions pose a serious threat to the health of urban trees, affecting the effective development of the ecological, social and economic benefits of trees. In order to find the risk and influencing factors of urban tree health, a tree health index system was constructed from 4 dimensions and 12 indexes. Based

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31770750, 31971713)

收稿日期: 2021-06-11; **采用日期:** 2022-02-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: halik@xju.edu.cn

on the survey of 117 sample plots in core urban area of Urumqi, through analyzing the tree composition, structure, association, health status and its influencing factors, the differences of tree health are revealed in different functional zones. The purpose is to provide theoretical basis and data support for tree health protection and sustainable management of urban green space in the study area, which is of great significance to play the landscape service function of green space and improve the degree of urban ecological civilization. The results show that: (1) the average ratio of trees to shrubs in core urban areas in Urumqi is 8.3:1; especially, the tree species diversity, inter and intra correlation of urban green species are low. Elm (*Ulmus spp.*) accounts for 43.87% of the total urban trees, of which *Ulmus pumila* accounts for 22.62%, which is the main dominant tree species. (2) There are some differences of the health status between different Elm species. The overall health status of the Elm species elaborates the characteristics of *Ulmus densa* > *Ulmus laevis* > *Ulmus pumila* > *Ulmus pumila* cv. *pendula*. (3) The tree health presents heterogeneity in different urban functional zones, which main public parks and residential areas are higher, while roadside and schools are relatively lower. The redundancy analysis further reveals that ground pavement, tree configuration structure, growth space and diameter at breast height (DBH) have the greatest contribution on the tree health. In the future, optimizing urban tree habitat conditions, improving species richness, strengthening conservation of ancient trees and improving landscape planning and management level are important measures to maintain and improve the health status of urban trees in arid land oasis cities.

Key Words: oasis cities; urban tree health; redundancy analysis; influencing factors; Urumqi

城市绿地是城市生态系统重要组成部分,对其组分、结构、功能和景观可持续性具有重要价值。城市树木作为城市绿色基础设施重要成分,不仅提供降温、空气净化、固碳释氧、水源涵养等生态系统调节服务,也更多地扩展到文化服务^[1-3]。然而,极端干旱、低温等自然因素长期胁迫城市小气候和土壤微生境,加之城市化进程中生态用地被挤占、树木管护不当等人为因素对城市树木健康造成严重威胁^[4-5]。不仅影响城市树木生态服务功能高效发挥,也威胁人身财产安全。因此,科学合理评估树木健康,对保障树木生态环境效益及改善城市人居环境具有重要意义^[6]。

目前,国内外诸多学者已在不同城市开展树木健康及风险评估工作。研究多以古树名木为研究对象,结合实地调查分析树种组成、结构,评估树木健康和风险等级^[7-9]。研究方法主要包括传统目视健康评估和无损检测,前者通过构建树木生长指标体系,目视判别树木形态和外貌健康状况^[10-12];后者基于应力波诊断法,用声学激光、伽马射线衰减等技术探明树木内部健康程度^[13-14]。此外,也有部分学者结合气象水文、土壤环境、微生物等揭示树木健康主导因子^[15]。尽管现阶段已开展诸多树木多样性及组成结构、树木健康风险评估及影响因素、树木损伤及修复等研究工作,然而现有研究尺度主要集中于单一树种和小尺度样方调查,仅能反映个体层面特征,缺乏不同代表性树种、功能区差异和区域典型性研究(图1)。研究内容多侧重于树木组成、结构特征分析,而对大尺度树木健康评价、影响因素及空间异质性定量研究相对匮乏^[9, 16-17]。

乌鲁木齐市作为典型干旱区绿洲城市,是我国“一带一路”战略重要交通枢纽。极端干旱区水资源限制,导致树木生境质量低下、树势衰弱、存活率低等问题突出,严重阻碍树木生态服务功能发挥^[18]。尽管北京、上海、广州等地已开展城市树木健康评估工作^[11, 19-21],但我国东部发达城市与西北干旱区存在完全不同的树木种类、生存环境和健康风险,东部发达城市评价指标、评估结果及保护措施难以直接套用于西部干旱区。此外,有关乌鲁木齐树木现有研究主要集中于小尺度调查,侧重于种类组成、植物适宜性评价等研究内容^[22-23]。针对大尺度范围内树种组成、分布及健康状况,不同树种缺陷特征及影响因素,不同功能区树木风险特征及空间差异等科学问题尚未深入研究。鉴于此,本研究基于干旱区生态环境现状构建多维健康评估指标体系,基于117个样方实地调查结果,揭示乌鲁木齐市城市树木组成、结构及健康分布,评估树木缺陷及影响因素。在此基础上揭示不同功能区树木健康状况及空间异质性,旨在为干旱区树木保育及风险防范提供科学依据。

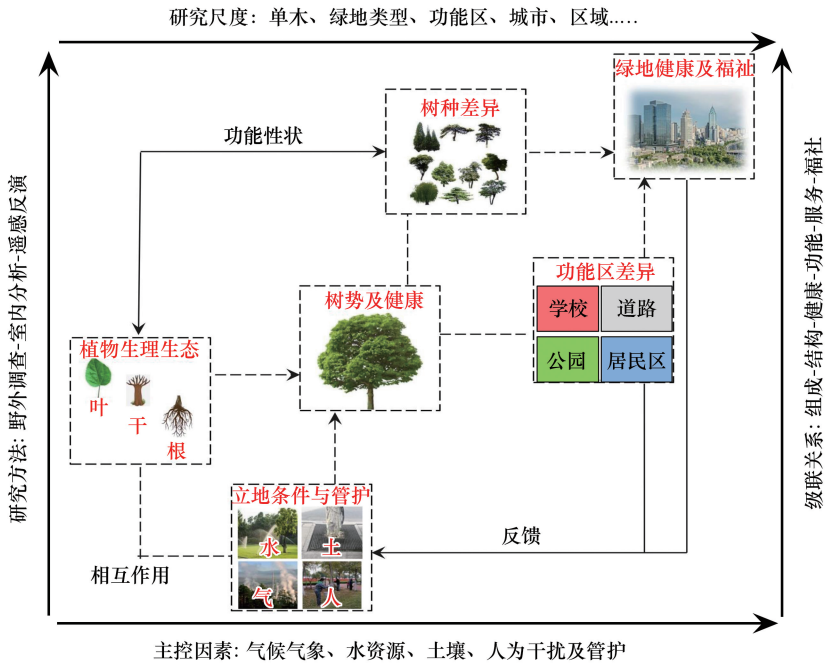


图 1 树木健康与居民福祉的关系
Fig.1 The relationship between tree health and human wellbeing

1 研究区概况

乌鲁木齐市(86°37′—88°58′ E,42°45′—45°00′ N)位于我国西北极端干旱区,“一带一路”丝绸之路经济带核心城市(图2)。行政区总面积 $1.40\times10^4\text{ km}^2$,人口 3.50×10^6 人,下辖7区1县。研究区属中温带大陆性干旱气候,气候干燥,蒸发强烈,年均气温6.4℃,年均降水量280 mm,潜在蒸发高达2830 mm。地形南高北低,海拔高差约5000 m,地形起伏较大。土壤类型以风沙土、棕钙土和灰漠土为主^[24]。城区绿化覆盖面积

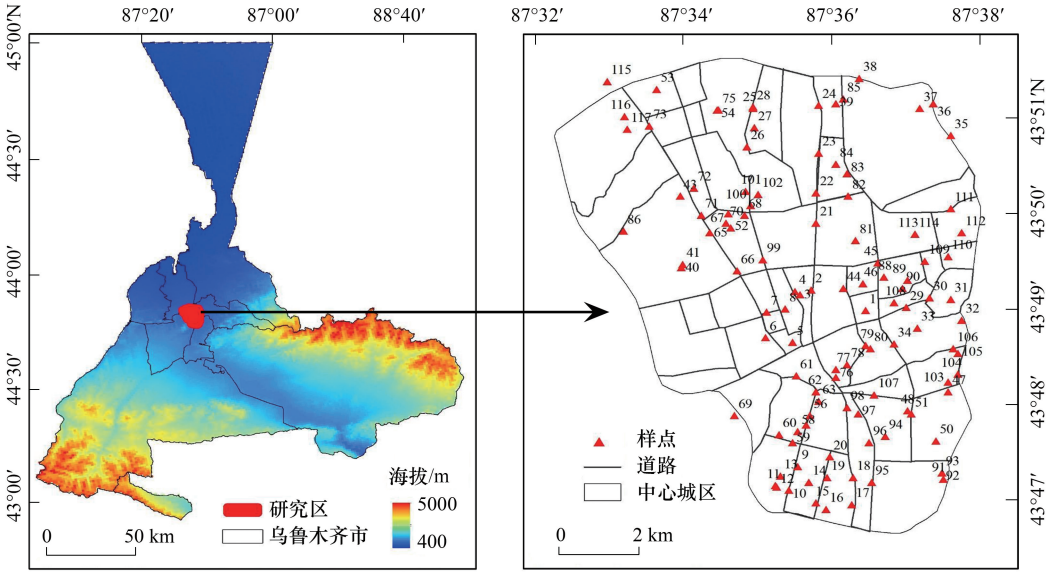


图 2 研究区及样点分布图
Fig.2 Study area and sample points

360 km²,绿化园林植物 465 种,常用园林绿化乔木 20 种^[22]。长期水资源限制是制约区域社会经济发展和树木生态保护的主要影响因素。

2 研究方法

2.1 树木健康调查及评价

基于 2020 年遥感影像解译结果,结合高德地图和现场勘查实况,在划定研究区 5 km × 5 km 网格基础上,兼顾不同树木类别、密度、分布、生长地点及功能区类型,共选取 117 个代表性样点,各样点根据树种密度设置 30 m × 30 m、20 m × 10 m 等不同大小样方(图 2)。调查于 2021 年 5 月 1—20 日各树种生长旺盛期进行,通过实测与目测相结合的方法对样方内不同径级及长势树木健康指标进行现场测定^[10]。同时,记录调查树木种名、株树、树高、胸径、冠幅、蓬径及盖度等指标,记录各样方经纬度、海拔、地形地貌、人类活动类型及强度等。

参考邵鹏、黄帅帅和刘晓玥等相关研究成果^[10-11, 25],基于定量化和层次化原则,统筹干旱区现有树木调查评估方法^[22, 26],充分考虑干旱区绿洲城市气候、土壤、水分等因素,筛选树势、枝叶、树干、根系 4 个维度 12 个评价指标(表 1)。采用专家打分法对各指标进行重要性评估,最终根据评价指标及权重建立树木健康评价模型:总体健康状况 $H = H1 \times 0.215 + H2 \times 0.038 + 3 \times 0.053 + H4 \times 0.143 + H5 \times 0.052 + H6 \times 0.108 + H7 \times 0.075 + H8 \times 0.030 + H9 \times 0.156 + H10 \times 0.052 + H11 \times 0.038 + H12 \times 0.040$ 。对评价指标数据进行标准化处理,通过加权求和的方法计算每株树木的多维健康指标得分及健康程度得分,进一步将健康划分为 3 个等级: > 3.5、2.5—3.5、< 2.5,对应树木健康状况为“健康”、“亚健康”、“不健康”。

为揭示不同树种间关联程度,将 117 个样点中成对树种共存情况排列为 2 × 2 联列表,然后利用 Jaccard 定量修正公式计算种间关联系数,绘制树种间关联性半矩阵图^[27]。IC (Inter correlation) 计算公式如下:

$$IC_{(e)} = \frac{Ma/2}{Mb + Mc + Ma/2} \times 100$$

式中, $IC_{(e)}$ 为树种间关联系数; Ma 为同时出现两个种的样方数; Mb 为 B 种单独出现的样方数; Mc 为 A 种单独出现的样方数。

2.2 数据处理

研究采用单因素方差分析(One-way ANOVA)揭示不同树种间健康状况差异;将树木健康作为因变量,选取树高、胸径、冠幅、枝下高、地面铺装、林木配置结构、生长空间和光污染程度 8 个主要指标作为自变量,基于 CANOCO 4.5 软件平台,采用冗余分析方法(Redundancy Analysis),通过蒙特卡洛模拟运行 499 次,探究树木健康与各影响因子间相关关系;结合功能区分区,揭示不同功能区树木健康特征及空间异质性。数理统计分析及制图均在 Microsoft Office Excel 2010、SPSS 16.0 和 ArcGIS 10.1 软件支持下完成。

3 研究结果

3.1 树种组成、结构及关联性

基于本研究实地调查成果,参考树种调查名录,共查明乌鲁木齐市园林植物 35 科,85 属,279 种,其中乔木 112 种,灌木 155 种,藤本 12 种^[22]。高频分布前 30 树种见表 2 所示。其中蔷薇科包含 3 属,8 种,属种类别最丰富。研究区树木类型以落叶乔木为主(82.15%),伴有少量常绿针叶乔木(3.47%)和灌木(10.26%)。针对研究区各树种数量分布而言,榆科是树种分布数量最多的科,其中白榆数量最多,占总调查样本的 22.62%,其次为大叶榆(10.18%)、圆冠榆(7.19%)、复叶槭(7.11%)、杨树(6.14%)、白蜡(4.36%)、垂枝榆(3.88%)和旱柳(3.88%)。不同树种间树高、胸径、冠幅等呈现差异性,其中杨树树高和胸径均明显高于旱柳及其它树种,夏橡冠幅和枝下高最高,其次为白榆和旱柳等。

表 1 树木健康状况评价指标体系
Table 1 Tree health evaluation index systems

一级指标 Level indicators	二级指标 The secondary indicators	权重 Weight	指标描述 Indicator description	评价标准 Evaluation standard				
				4	3	2	1	0
树势 Vitality	树势 H1	0.215	树木总体生长状况	长势旺盛,无不良状况	有一定程度衰弱	衰弱十分明显	生长状况恶劣	濒临枯死
	倾斜度 H2	0.038	树干偏离垂直方向的程度	<5°	5°—10°	10°—15°	15°—20°	>20°
	大枝损伤 H3	0.053	各级枝条损伤程度	无	极少	较为明显	很明显且出现折断	大部分缺损
	顶梢枯死 H4	0.143	树冠枝条死亡状况	无顶梢枯死	数条小侧枝枯死	数条侧枝枯死	数条主枝枯死	中心主枝枯死
	枝叶颜色 H5	0.052	变色叶片数量百分比	全部保持绿色	无明显变化(<10%)	轻微褪色(<25%)	中等褪色(26%—60%)	严重褪色(>60%)
树干 Trunk	枝叶病害 H6	0.108	细菌、真菌等对树木影响程度	树干和叶面无病斑,长势良好	树干少量腐朽,少量叶面病斑	树干明显腐朽,枝叶不良	大面积腐朽,枝叶长势差	树干腐朽严重,枝叶极少
	枝叶虫害 H7	0.075	昆虫或蛛螨对树木影响程度	无虫害,生长良好	有少量虫害,总体生长良好	虫害明显,长势有不良影响	虫害严重,严重影响生长	虫害极为严重,濒临死亡
	寄生 H8	0.030	细菌真菌和原生动物寄生程度	树木无寄生植物	树木<25%的体积受到危害	树木 25%—50%受到危害	树木 50%—75%受到危害	树木 > 75%的体积受到危害
	树干洞穴 H9	0.156	洞穴面积占树干面积比	无干基腐朽/无洞穴	干基腐朽/洞穴<1/8树干面积	干基腐朽/洞穴占比 1/8—1/4	干基腐朽/洞穴占比 1/4—1/2	干基腐朽/洞穴占比>1/2
	树干损伤 H10	0.052	树皮完整程度	无机械损伤	损伤占树皮半周长比例<1/3	损伤占树皮半周长 1/2—2/3	损伤占树皮周长 1/2—2/3	损伤占树皮周长比例>2/3
根系 Soil-root	根系裸露 H11	0.038	裸露根系面积占总面积比	无裸露根系	根系裸露 1/8	根系裸露 1/6	根系裸露 1/4	根系裸露 1/2
	地面铺装 H12	0.040	地面铺装状况	有机物	绿地覆盖	砖、铁篦子、水泥、碎石	裸地覆盖	硬质铺装

表 2 研究区树种组成及结构
Table 2 Composition and structure of tree species

树种 species	科属 Family	生长型 Growth form	树高/m Tree height	胸径/cm DBH	冠幅/m Crown diameter	枝下高/m High under the branches	数量比/% Proportion
白榆 <i>Ulmus pumila</i>	榆科榆属	落叶阔叶乔木	12.5±4.65	36±18	7.5±3.15	3.4±1.88	22.62
大叶榆 <i>Ulmus laevis</i>	榆科榆属	落叶阔叶乔木	11.3±4.45	28±11	6.2±2.35	3.2±1.67	10.18
圆冠榆 <i>Ulmus densa</i>	榆科榆属	落叶阔叶乔木	10.5±3.71	30±9	6.2±2.14	2.1±1.12	7.19
复叶槭 <i>Acer negundo</i>	槭树科槭属	落叶阔叶乔木	10.4±4.33	27±12	6.4±2.31	3.4±1.44	7.11
杨树 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	杨柳科杨属	落叶阔叶乔木	18.7±5.51	43±21	6.6±3.23	4.3±2.60	6.14
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	木犀科枹属	落叶阔叶乔木	9.9±3.55	25±10	5.7±2.04	3.8±1.99	4.36
垂枝榆 <i>Ulmus pumila</i> cv. <i>pendula</i>	榆科榆属	落叶阔叶乔木	5.8±2.35	20±11	3.7±1.42	2.6±0.93	3.88
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	杨柳科柳属	落叶阔叶乔木	14.2±9.15	40±20	7.0±2.43	2.9±1.47	3.88
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	木犀科丁香属	落叶灌木	3.7±4.79	19±14	2.3±1.55	0.9±0.62	3.80
苹果 <i>Malus domestica</i>	蔷薇科苹果属	落叶阔叶乔木	6.3±1.79	17±7	4.4±1.92	2.0±1.28	2.83
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i>	蔷薇科桃属	落叶灌木	3.6±2.83	10±9	2.7±1.59	1.2±1.47	2.26
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	松科松属	常绿针叶乔木	9.0±3.81	18±8	4.0±1.72	2.5±1.29	2.02
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	杨柳科柳属	落叶阔叶乔木	11.7±3.38	34±15	5.7±2.51	3.1±2.20	1.94
海棠花 <i>Malus spectabilis</i>	蔷薇科苹果属	落叶灌木	5.2±1.72	13±7	3.7±1.36	1.6±0.99	1.94
金叶榆 <i>Ulmus pumila</i> cv. 'Jinye'	榆科榆属	落叶阔叶乔木	1.8±1.28	4±2	0.9±0.50	0.9±0.63	1.86
毛桃 <i>Amygdalus persica</i>	蔷薇科桃属	落叶阔叶乔木	6.3±1.63	17±9	5.4±2.22	2.4±1.34	1.53
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	槭树科盐肤木属	落叶阔叶乔木	7.7±8.66	9±4	2.7±0.83	1.9±1.01	1.45
云杉 <i>Picea asperata</i>	松科云杉属	常绿针叶乔木	6.9±5.24	8±4	2.2±0.91	1.4±0.86	1.45
小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i>	黄杨科黄杨属	常绿灌木	1.0±0.34	10±7	0.8±0.30	0.6±0.37	1.37
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i>	蔷薇科李属	落叶阔叶乔木	4.8±1.15	8±5	2.7±1.38	1.5±0.41	1.05
红瑞木 <i>Swida alba</i>	山茱萸科柞木属	落叶灌木	1.7±1.06	7±8	1.3±1.02	0.4±0.43	0.89
龙爪柳 <i>Salix matsudana</i> var. <i>tortuosa</i>	杨柳科柳属	落叶阔叶乔木	8.5±3.05	30±12	5.1±1.44	2.1±1.06	0.89
美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	木犀科枹属	落叶阔叶乔木	9.4±3.76	22±11	6.1±2.57	3.1±2.92	0.89
夏橡 <i>Quercus robur</i>	壳斗科栎属	落叶阔叶乔木	12.0±3.71	41±17	12.3±5.59	5.7±1.56	0.89
尖果沙枣 <i>Elaeagnus oxycarpa</i>	胡颓子科胡颓子属	落叶阔叶乔木	5.5±2.72	18±9	3.6±1.57	1.8±1.55	0.81
李 <i>Prunus salicina</i>	蔷薇科李属	落叶阔叶乔木	4.0±1.12	6±2	1.9±0.88	1.2±0.30	0.65
山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	蔷薇科桃属	落叶阔叶乔木	5.9±1.77	15±6	5.8±1.59	1.6±0.58	0.57
花红 <i>Malus asiatica</i>	蔷薇科苹果属	落叶阔叶乔木	5.1±2.09	12±8	3.0±1.75	1.3±0.34	0.48
黄金树 <i>Catalpa ovata</i>	紫葳科梓属	落叶阔叶乔木	6.4±2.98	15±6	3.9±0.70	3.1±1.03	0.48
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	槭树科槭属	落叶阔叶乔木	8.7±5.26	26±14	5.5±2.46	2.5±1.00	0.48

半矩阵图可反映植物群落树种间配对关联的模糊关系,深入揭示树种配对关联性及其配置间离散程度(图3)。结果显示,乌鲁木齐市高度关联的3组树种为:1)白榆、大叶榆、圆冠榆、复叶槭、杨树、白蜡、垂枝榆、旱柳、紫丁香、苹果;2)紫丁香、苹果、榆叶梅、樟子松、垂柳、金叶榆、火炬树、云杉、小叶黄杨;3)毛桃、火炬树、云杉、紫叶李、李、花红。其中小叶黄杨和紫叶李的关联系数最高,达22,而其余树种间关联系数均小于20,树种间联结程度相对较低。说明乌鲁木齐市城市森林群落独立性较强,种间联结存在松散性,进一步解释了树种间具有明显次生性。

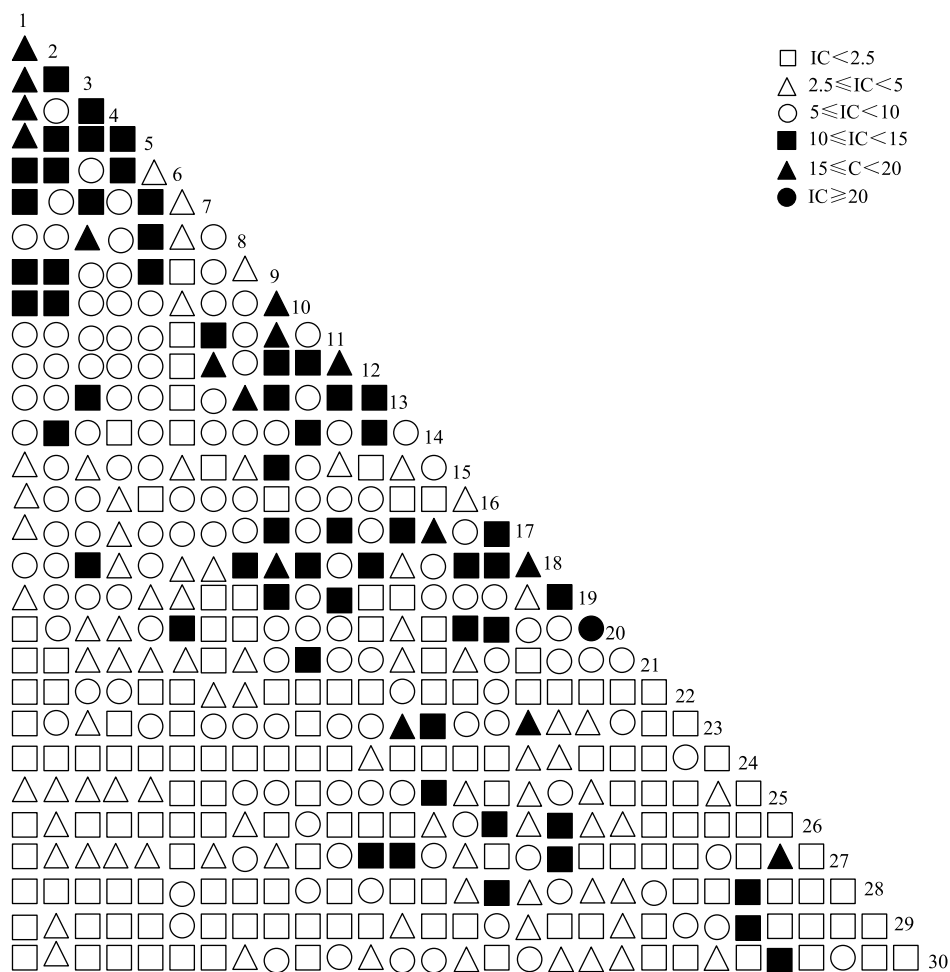


图3 30种树种关联分析半矩阵

Fig.3 A semi-matrix of association analysis of 30 species

IC (inter correlation): 组间关联; 数字1—30 分别代表树种: 1: 白榆, 2: 大叶榆, 3: 圆冠榆, 4: 复叶槭, 5: 杨树, 6: 白蜡, 7: 垂枝榆, 8: 旱柳, 9: 紫丁香, 10: 苹果, 11: 榆叶梅, 12: 樟子松, 13: 垂柳, 14: 海棠花, 15: 金叶榆, 16: 毛桃, 17: 火炬树, 18: 云杉, 19: 小叶黄杨, 20: 紫叶李, 21: 红瑞木, 22: 龙爪柳, 23: 美国红栎, 24: 夏橡, 25: 尖果沙枣, 26: 李, 27: 山桃, 28: 花红, 29: 黄金树, 30: 元宝槭

3.2 不同树种健康特征及影响因素

鉴于榆科是研究区高频分布树种(占比43.87%),也是乌鲁木齐市“市树”,选择分布广泛、培育悠久的白榆、大叶榆、圆冠榆和垂枝榆作为研究对象,分析基于多维指标的树种间健康状况差异(图4)。不同树种间健康状况总体呈现圆冠榆(3.40) > 大叶榆(3.30) > 白榆(3.20) > 垂枝榆(3.10)特征,圆冠榆得分最高,其次为大叶榆,而白榆和垂枝榆得分较低,主要由于研究区白榆树龄普遍偏高,长势呈现衰弱特征。各树种间不同部位健康状况整体表现为:树干(3.60) > 枝叶(3.30) > 树势(3.10) > 根系(3.00)。且不同树种间树势、枝叶、树干和根系健康状况呈现差异性(图5)。其中,树势和树干健康状况均呈现圆冠榆 > 大叶榆 > 垂枝榆 > 白榆

特征。枝叶和根系状况以圆冠榆最优,健康:亚健康:不健康数量比分别为 2:1:0 和 2:2:1,垂枝榆健康状况最差。

RDA 结果显示,第一和第二轴分别占总方差的 92.91%和 5.22%(表 3)。其中,树高、胸径、冠幅、枝下高等自变量与树木树冠、枝叶、树干和整体健康程度均呈显著负相关;林木配置结构、光污染程度、生长空间等自变量与树木树冠、枝叶、树干、根系和整体健康均呈正相关(图 6)。此外,从各自变量影响程度来看,地面铺装、林木配置结构、生长空间和胸径对树木健康影响程度最高,进一步揭示恶劣生长环境下老龄树种具有低健康和高风险特征。

3.3 不同功能区树木风险特征及空间差异

不同功能区树木健康呈现空间异质性(图 7)。各功能区整体呈现“公园(3.50)>二三级道路(3.40)>一级道路(3.20)>居民区(3.10)>学校(3.00)”特征。各功能区树种不同部分健康状况整体表现为“公园>居民区>学校”(图 8)。树木健康得分最低的 5 个区域树种为:一级道路垂枝榆(3.2)>居民区垂枝榆(3.17)>居民区白榆(3.16)>学校大叶榆(2.99)>学校白榆(2.95)(图 9)。

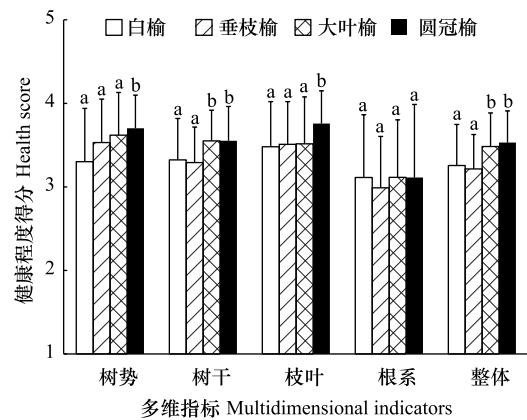


图 4 各树种间健康状况显著性差异

Fig. 4 There were significant differences in the health status among the species

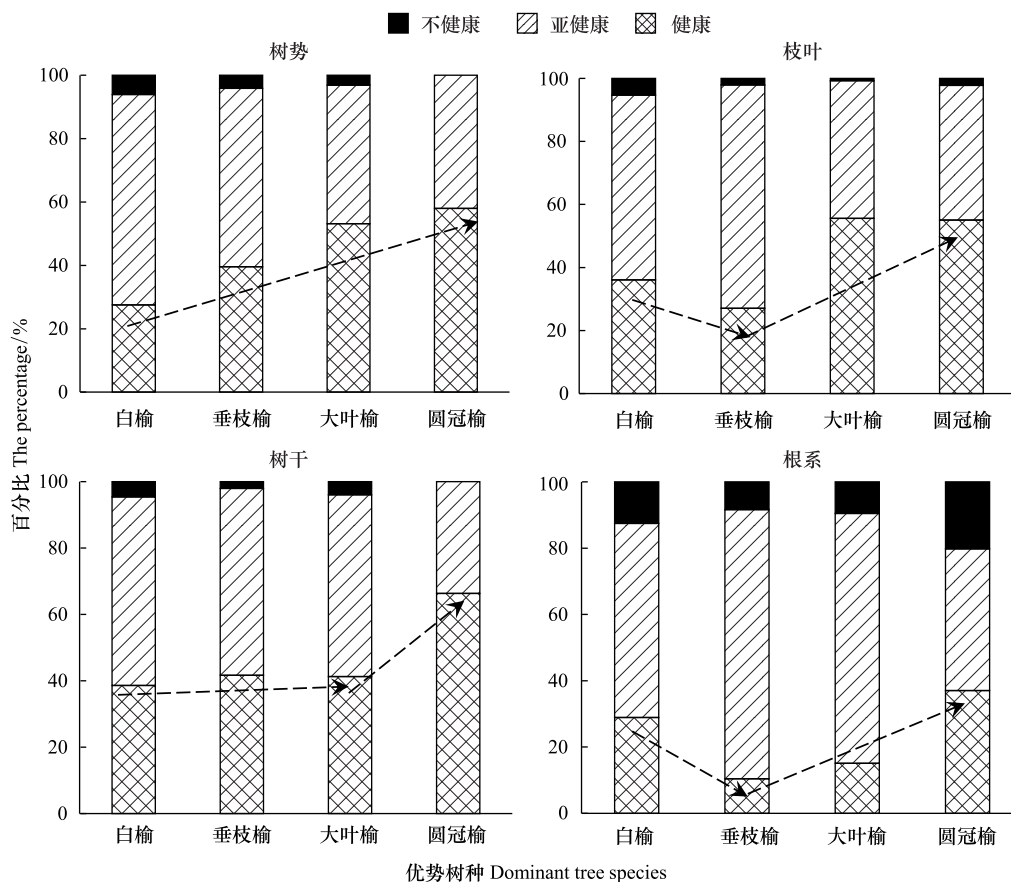


图 5 不同树种间多维健康指标比较

Fig. 5 Comparison of multi-dimensional health indicators among different tree species

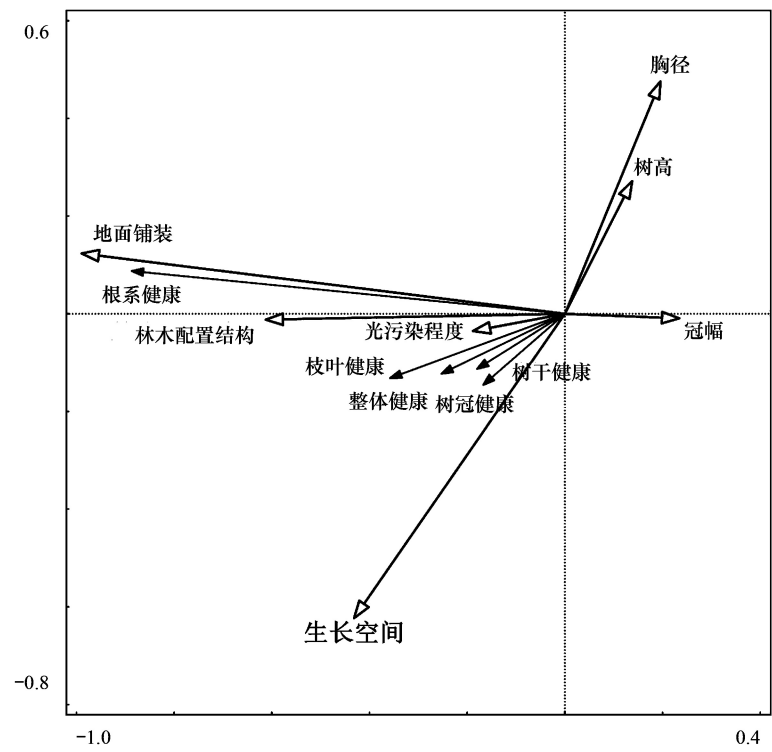


图 6 树木健康影响因素

Fig.6 Factors affecting tree health

表 3 冗余分析结果

Table 3 Redundancy analysis results

参数 Parameters	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.2348	0.0132	0.0040	0.0007
解释变量 Explained variation	23.48	24.80	25.20	25.27
伪相关 Pseudo-canonical correlation	0.8112	0.1750	0.1635	0.1085
解释拟合变量 Explained fitted variation	92.91	98.13	99.72	100.00

pseudo- $F=28.6$, $P=0.002$

4 讨论

4.1 树种组成、分布及风险特征

本研究基于 117 个样方实地调查结果,揭示乌鲁木齐市城市树木组成、结构及健康分布,结果显示乌鲁木齐市树木乔灌比为 8.3:1,远高于东部亚热带地区相关研究成果^[28],主要由于乌鲁木齐位于极端干旱区,树种选择偏向于耐干旱、抗贫瘠、涵养水分能力强的树种,水资源短缺和低成活率限制高耗水灌木树种的选取与栽种。常绿乔木与落叶乔木数量比为 1:24,低于 2008 年古丽巴衣那调查结果^[29],主要由于本研究基于主城区大尺度样方调查,样方区域范围相对更大,落叶乔木调查更为全面。针对树木分布频度而言,榆树是乌鲁木齐主要建群种,占比高达 43.87%,其余优势树种为白蜡、复叶槭等,与徐海玲的研究结果相似^[22]。此外,本研究进一步揭示主要优势树种间关联程度,白榆、大叶榆、圆冠榆、复叶槭、杨树、白蜡、垂枝榆、旱柳、紫丁香和榆叶梅间关联性最强,而其它树种关联较弱,集中体现乌鲁木齐市绿化树种组成相对单一,城市森林群落尚处于演替前期阶段,暂未完全形成稳定、协调的种间关系。

通过树木健康分析,结果揭示不同树种间健康呈现差异性,其中圆冠榆健康程度最优,其次为大叶榆和白

榆,健康最劣为垂枝榆。由于垂枝榆树冠呈现伞形分布,排列紧密,树梢枯死严重,进而导致光合效率降低。冗余分析进一步揭示树种健康程度的影响因素,地面铺装、林木配置结构、生长空间和胸径对树木健康影响程度最高。一方面,乌鲁木齐市地面铺装和林木配置结构自“硬地铺装”至“有机铺装”高达 10 余种(图 10)。水泥等硬质铺装阻碍降水下渗,影响土壤及根部呼吸,加之乌鲁木齐极端干旱环境,间接导致缺水而出现根系及叶片枯死;另一方面建筑物间紧密的空间环境使树木生长受限,在树形、树势及光合作用等方面影响树木健康^[30]。此外,由于乌鲁木齐市在 2000—2020 年受创建国家园林城市、生态园林城市、生态文明城市等政策号召,主城区内绿化树种种植于不同年份,胸径较粗和树龄较大树种因新陈代谢衰弱导致健康风险增加。值得注意的是,不同功能区树种健康也呈现差异性。集中体现为“公园 > 居民区 > 二三级道路 > 一级道路 > 学校”,功能区健康特征与北京、南京研究结果相似^[30—31]。公园树木生长最优,主要由于公园管理委员会定期开展管护工作,采取树木施肥、灌溉、刷白、支撑等措施维护

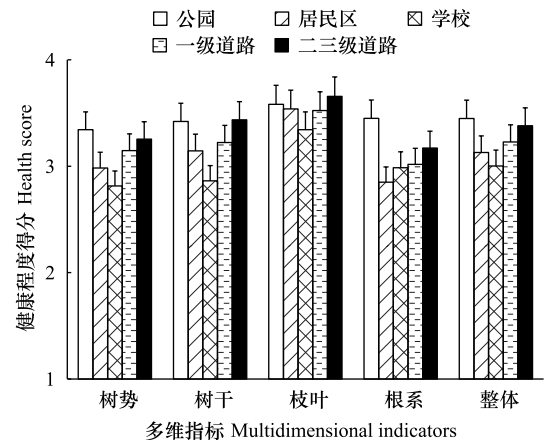


图 7 各功能区树木健康指标差异

Fig.7 The differences of tree health indexes in different functional areas

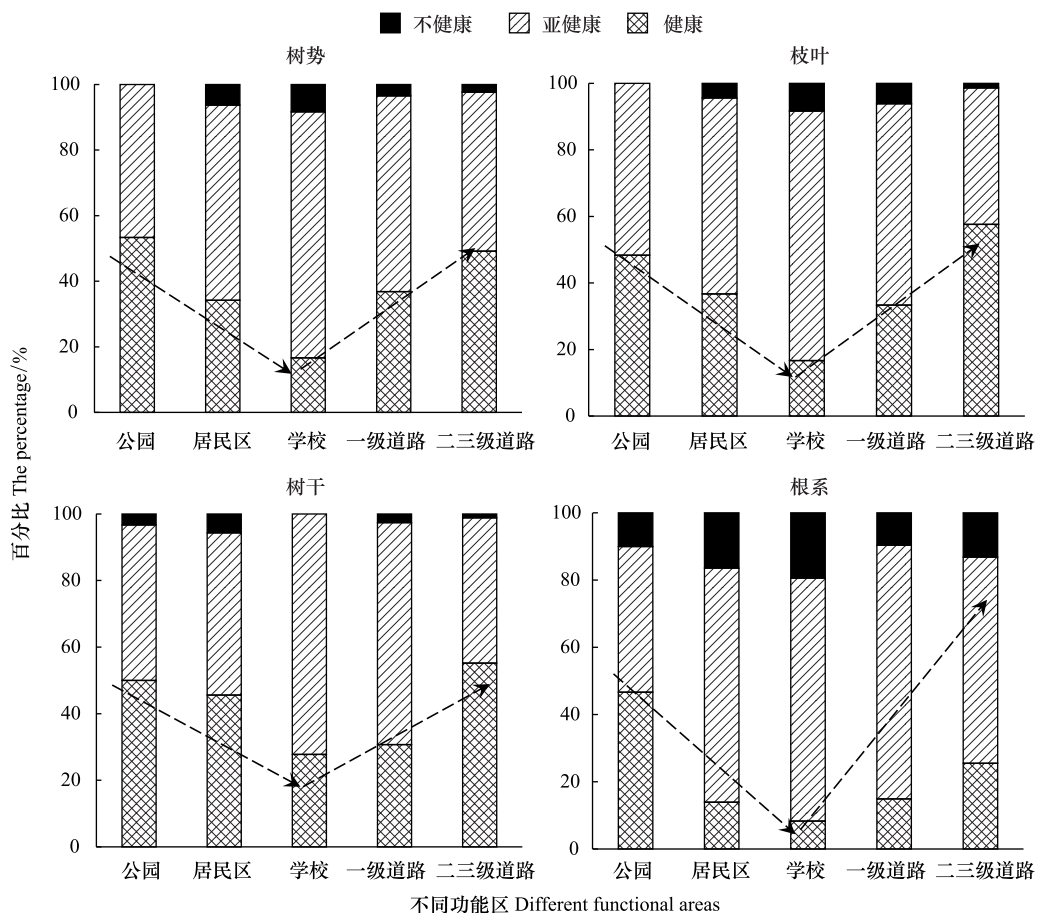


图 8 不同功能区多维健康指标差异

Fig.8 Difference of multi-dimensional health indicators in different functional areas

树木健康,同时,公园树木物种丰富,群落稳定性较高^[32]。不同道路间树木健康状况有一定差异,主要由于不同等级道路绿化工作具有时间差异,二三级道路树木树龄偏小,在树势、干形、枝叶和根系方面健康状况均要优于一级道路。学校和居民区树木生长状况不良,树势和根系部分问题严峻,建筑物之间紧密的空间环境导致树木生长受限,影响树木形态伸展,树势衰弱;同时密集的人为活动导致土壤孔隙度下降,透水性降低,影响树木健康^[30]。

4.2 城市森林可持续管理

通过开展大尺度树木健康调查,可有效揭示树木健康特征及影响因素,为树木保育及城市森林可持续管理提供支撑。本研究发现:(1)乌鲁木齐树种单一、种间关联程度相对较低;(2)乌鲁木齐主要优势树种中以白榆和垂枝榆健康风险最高;(3)居民区、学校和一级道路内榆树风险最高;(4)地面铺装、林木配置结构、生长空间是主要立地影响因子。基于现有问题,结合干旱区水资源短缺、地形起伏大、植被存活率低、资金相对匮乏等多重因素限制,在考虑生态用水和生态用地的基础上,优先筛选研究区乡土耐旱树种,融合城市“十四五”发展规划,注重树种多样性,营造多样化的绿地空间,以形成与城市环境相适应的多物种共存的城市森林群落^[33]。针对白榆和垂枝榆等高风险树种,建议及时修剪枯枝,合理处理受损部位,规范修枝技术,以改善垂枝榆健康状况。公园和居民区内白榆树龄偏大,病虫害、大枝损伤、顶梢枯死、叶片密度降低、褪色等现象严重,建议有关部门采取树干支撑、施加药物等技术手段来维持其生长。考虑到立地环境对树木健康影响程度,建议及时修建树穴、树池,减少硬质铺装,增加有机质及绿地覆盖,同时在极端干旱区继续推行滴灌、喷灌,合理确定“喷、滴”时间、频次和水量,确保满足树木最小需水量,改善乌鲁木齐树木根系健康。考虑到恶劣生长环境下的老龄树种具有低健康和高风险特征,建议增

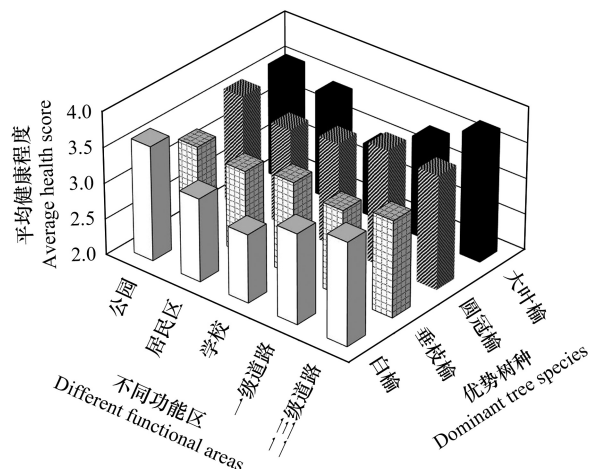


图9 树木风险空间分布特征

Fig.9 Spatial distribution characteristics of tree risk



图10 园林树木基部立地环境

Fig.10 Site environment of the base of garden trees

加针对古树名木的保育,定期开展传统目视及空腐诊断监测工作,构建树木健康数据库,密切关注制约树木生长关键因素,如干旱缺水、树干倾斜、顶梢枯死、病虫害、树干洞穴、人为踩踏等,构建树木保育措施体系,科学有效降低树木健康风险。

5 结论

本文以乌鲁木齐市为研究区,在现场调查基础上,构建树木健康评价指标体系,对树木健康状况进行综合评价。结论如下:(1)乌鲁木齐市树木乔灌比为 8.3:1,树种多样性较低且种间关联程度较低。(2)不同树种及功能区间树木健康均呈现差异性。以圆冠榆健康得分最高,垂枝榆健康得分最低。且公园树木健康得分最高,而学校树木健康得分最低。(3)冗余分析结果揭示了地面铺装、林木配置结构、生长空间和胸径对树木健康影响程度最高,进一步揭示恶劣生长环境下老龄树种具有低健康和高风险特征。未来树木健康保育中,应重点关注不同功能区榆树健康状况,注重树种多样性,改善立地条件,营造多样化绿地空间,以形成与城市环境相适应的多物种共存的城市森林群落。

致谢:感谢毛雨晴对本研究野外调查的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Von D P, Haase D. Risk assessment concerning urban ecosystem disservices: the example of street trees in Berlin, Germany. *Ecosystem Services*, 2019, 40: 101031.
- [2] Pugh T A M, MacKenzie A R, Whyatt J D, Hewitt C N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14): 7692-7699.
- [3] Coutts A M, White E C, Tapper N J, Beringer J, Livesley S J. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(1/2): 55-68.
- [4] Thomsen P, Bühler O, Kristoffersen P. Diversity of street tree populations in larger Danish municipalities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 15: 200-210.
- [5] Ye Y H, Lin S S, Wu J, Li J, Zou J F, Yu D Y. Effect of rapid urbanization on plant species diversity in municipal parks, in a new Chinese City: Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 221-226.
- [6] Halik Ü. Urban greening in arid regions: the example of the oasis cities in southern Xinjiang/China, with special consideration of ecological, socio-economical, and cultural aspects. Berlin: TU Berlin Press, 2003.
- [7] Jim C Y, Zhang H. Defect-disorder and risk assessment of heritage trees in urban Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 585-596.
- [8] 申家轩. 北京市大兴区古树名木资源调查与保护研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [9] 马杰, 贾宝全, 张文, 刘秀萍, 李晓婷, 刘佳. 北京市六环内城市森林结构总体特征. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2318-2325.
- [10] 邵鹏. 北京城市核心区国槐行道树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [11] 黄帅帅, 曹哲源, 邱尔发, 牛少锋, 邢立捷. 北京市居住区林木健康评价. *生态学报*, 2019, 39(24): 9222-9232.
- [12] Chau N L, Jim C Y, Zhang H. Species-specific holistic assessment of tree structure and defects in urban Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 55: 126813.
- [13] 安源. 基于应力波的木材缺陷二维成像技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [14] Qin R Y, Qiu Q W, Lam J H M, Tang A M C, Leung M W K, Lau D. Health assessment of tree trunk by using acoustic-laser technique and sonic tomography. *Wood Science and Technology*, 2018, 52(4): 1113-1132.
- [15] Bertolin C, Caratelli A, Grimaldi M, Massi M. Analysis of Jerk as a novel tree-falls hazard index: a case study applied to tree monitoring in the archaeological park of the Colosseum in Rome (Italy). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 56: 102122.
- [16] 李佳慧, 彭祚登, 刘勇, 马红. 北京市首都功能核心区国槐健康评价及其影响因素研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(1): 64-73, 84.
- [17] 李晓婷, 刘佳, 姜莎莎, 贾宝全. 北京城区医院绿地林木树冠覆盖与城市森林结构分析. *生态学报*, 2019, 39(22): 8392-8403.

- [18] 杨旭东. 榆树在乌鲁木齐市的应用及其虫害调查分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [19] 贺坤, 宋平, 王本耀, 严巍, 宋婷. 上海城市行道树安全风险评估研究. 中国园林, 2021, 37(9): 106-111.
- [20] 黎彩敏, 翁殊斐, 庞瑞君. 广州市 14 种常用园林树木健康评价. 西北林学院学报, 2010, 25(2): 203-207.
- [21] Jim C Y, Chen S S. Assessing natural and cultural determinants of urban forest quality in Nanjing (China). *Physical Geography*, 2008, 29(5): 455-473.
- [22] 徐海玲. 乌鲁木齐市园林植物及其应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [23] 易治伍. 乌鲁木齐市园林植物适宜性评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [24] 乌鲁木齐市统计局. 乌鲁木齐统计年鉴(2019). 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [25] 刘晓玥, 杜燕, 郑小贤. 不同赋权法的将乐林场常绿阔叶林的健康评价. 森林与环境学报, 2015, 35(2): 141-146.
- [26] 古丽巴衣那 阿不都卡帕尔, 王利江. 乌鲁木齐市乡土树种在园林景观中的应用探讨. 防护林科技, 2014(11): 94-95.
- [27] 刘仲健. 深圳市园林绿化的植物配置和树种选择的分析. 中国园林, 1992, 8(1): 26-32.
- [28] 王盾, 王建兵, 郑丽燕, 陈善仪. 惠州西湖风景区消落带植物群落物种组成及多样性. 森林与环境学报, 2020, 40(6): 605-611.
- [29] 古丽巴衣那. 乌鲁木齐市园林树种初步调查. 安徽农业科学, 2008, 36(22): 9500-9501.
- [30] 卞方圆, 陈爽. 近 15 年来南京城市居住区树木结构变化研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(2): 127-133.
- [31] 李晓鹏, 董丽, 关军洪, 赵凡, 吴思佳. 北京城市公园环境下自生植物物种组成及多样性时空特征. 生态学报, 2018, 38(2): 581-594.
- [32] 赵娟娟, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 王效科. 北京城区公园的植物种类构成及空间结构. 应用生态学报, 2009, 20(2): 298-306.
- [33] 何兴元, 金莹杉, 朱文泉, 徐文铎, 陈玮. 城市森林生态学的基本理论与研究方法. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1679-1683.